DOI:10.13866/j.azr.2024.03.08

# 河西走廊中段荒漠植被组成及土壤养分空间分布特征

安 宁[1,2]， 郭 彬[3]， 张东梅[1]， 杨淇越[1]， 罗维成[1]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，中国科学院临泽内陆河流域研究站，中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 甘肃农业大学，甘肃 兰州 730070）

**摘 要：**荒漠植被是河西走廊绿洲生态安全防护的重要屏障，研究荒漠植被组成及土壤养分分布特征对于荒漠—绿洲过渡带荒漠植被建设及管理有重要意义。本研究基于大量野外调查，并使用传统统计学与地统计学方法，研究了河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南缘荒漠植被组成及土壤养分特征，并解析了其与环境因子的相关关系。结果表明：河西走廊中段及巴丹吉林沙漠西南缘荒漠区植物组成单一，多样性较低，且植物种类集中在少数科中，出现频度高的植物均为红砂（*Reaumuria songarica*）和白刺（*Nitraria tangutorum*）等典型荒漠植物。草本植物分布与年均降水量有较强相关性，研究区最南端的山丹县草本生物量达到108.01 $g\cdot m^{-2}$，在一定年降水量区间，灌木生物量随降水增加而增加，最高值出现在靠近祁连山北坡的肃州区，为134.03 $g\cdot m^{-2}$；降水量的增加，会显著促进草本植物的生长。研究区表层土壤有机碳、总氮、总磷含量最高，其平均值分别为2.12 $g\cdot kg^{-1}$、0.25 $g\cdot kg^{-1}$、0.41 $g\cdot kg^{-1}$，且离散程度较底层土壤更高；水平方向上三种土壤养分变异程度高，空间自相关性弱，最高值出现在张掖绿洲附近，分别达到11.22 $g\cdot kg^{-1}$、1.30 $g\cdot kg^{-1}$、0.73 $g\cdot kg^{-1}$。主成分分析显示，造成研究区生境差异的首要因素是土壤属性，其次是降水，但不同环境因子之间也会互相影响，共同驱动了荒漠植被组成及分布。

**关键词：**河西走廊中段；物种组成；土壤养分；环境因子；巴丹吉林沙漠南缘

河西走廊中段毗邻巴丹吉林沙漠及腾格里沙漠，风沙活动频繁、自然条件恶劣，在沙漠边缘及荒漠—绿洲过渡带分布着许多天然灌木、半灌木、草本植被及大量人工固沙植被。这些植被群落虽然结构较为简单、群落丰富度及盖度低，但具有良好的防风固沙功能，是保护绿洲安全的重要屏障[1]。近年来，受气候变化及不合理人类活动的双重影响，河西走廊绿洲区水资源供需矛盾显现，土壤含水率逐年下降，绿洲边缘土地旱化[2]，部分区域荒漠植被甚至出现不同程度的退化现象[3]，因此，荒漠植被的科学保育及管理迫在眉睫[4]。而探究荒漠植被组成、分布格局、土壤特征及其与关键环境因子的相关关系是实现固沙植被保育及管理的关键[5-7]。

植物的生长受众多环境因子的限制，在荒漠区，植物生长与资源分配之间的矛盾更加突出。水分是植物生长不可或缺的生态因子，在极度缺水的荒漠区，不同植物面对干旱有不同的适应策略，适应当地的降水格局是植物能够在竞争中得以存活的关键，水分条件也是影响生物多样性的主要因素[8-11]。地表植被的缺失和水分的匮乏使得干旱区表层土壤缺乏防护且相对疏松，风吹过沙地经常形成风沙流，风沙流限制植物光合作用，增加叶面蒸腾，沙子直接打击植物，还会损伤植物外部形态和生理构造[12]。受限于水分分配和风沙流的侵袭，能够适应荒漠区恶劣环境的植物少之又少。因此，荒漠区植物群落构成较为简单，物种组分相对单一，植被分布不均匀[13-14]，而研究荒漠区植被分布情况并探究其驱动因素对荒漠区植被恢复至关重要。

**收稿日期：**2023-11-27； **修订日期：**2024-01-01
**基金项目：**国家自然科学基金项目（42177457，52172300）；中国科学院“西部之光”项目；甘肃省青年科技基金（22JR5RA085）；国家科技基础资源调查专项（2017FY100200）
**作者简介：**安宁（1999-），男，硕士研究生，主要从事干旱区生态及土壤学研究. E-mail: Anning@nieer.ac.cn
**通讯作者：**罗维成. E-mail: luoweicheng@lzb.ac.cn

近年来地统计学方法已经被广泛应用于环境因子的空间异质性研究,例如,杨强军[15]利用地统计学方法研究了农耕地土壤养分分布特征,结果表明离城镇越近,土壤有机质含量越高,且有机质空间变异更大,发现人类农业活动对土壤有机质有重要影响。该方法也应用于对比绿洲区、山地森林区和荒漠区土壤养分的空间分布及差异,结果表明地统计学可以很好地证明土壤养分和盐度的空间变异性,有助于了解大尺度上的土壤条件[16]。根据利用地统计学方法得到的土壤有机碳含量预测图与地上生物量空间分布图密切相关这一结论,史尧方等[17]得到了阿里地区土壤有机碳与地上生物量分布密切相关的研究成果,这种分析模式也被应用在草地生态系统中,得到了草地生物量影响土壤速效氮的结论[18]。因此,利用地统计学方法能够很好地研究生态系统中某一环境因子的空间分布特征与格局,并提示可能造成这种格局的影响因子,为植被建设及管理提供科学支撑。

目前关于河西走廊和巴丹吉林沙漠荒漠植被的组成及分布的研究主要集中在植物群落的多样性及其分布特征等方面。而且目前的工作多集中在小尺度样地调查或者大尺度遥感影像分析[4,6,9],鲜见将样方调查数据升尺度到区域尺度的研究,因此不能准确反映河西走廊中部及巴丹吉林沙漠边缘荒漠植被组成及分布特征。基于此,本文以河西走廊中段及巴丹吉林沙漠边缘为研究区,通过大量的野外实地调查,结合地统计学方法,研究了荒漠植物群落组成、植被分布、土壤养分等的空间特征及其与环境因子的相关关系,以期为河西走廊及巴丹吉林沙漠边缘荒漠植被保育及管理提供理论依据。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

研究区主要包括河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南部边缘,行政区属涵盖了瓜州县、玉门市、嘉峪关市、肃州区、肃南裕固族自治县、高台县、临泽县、甘州区、山丹县、金塔县全部以及阿拉善右旗、额济纳旗、肃北蒙古族自治县大部(图1)。主要山脉有南部的祁连山,河西走廊北部的龙首山、合黎山,整个区域地势南高北低,海拔跨度较大,处于800~4500 m,最低点位于巴丹吉林沙漠北缘,最高点位于祁连山前。气候属于温带大陆性干旱气候,年平均降水量在36~200 mm,主要集中在每年6—8月,潜在蒸发量1600~2400 mm,年平均气温5~10 ℃,昼夜温差平均为15 ℃左右;土壤类型包括棕荒漠土、灰棕荒漠土、灰漠土、淡棕漠土和灰钙土。地带性植被主要由超旱生灌木、半灌木及一些草本植物组成。

### 1.2 调查方法

本次调查于2018年6—9月进行,在前期野外踏查的基础上选定调查样点,在每个调查样点上,

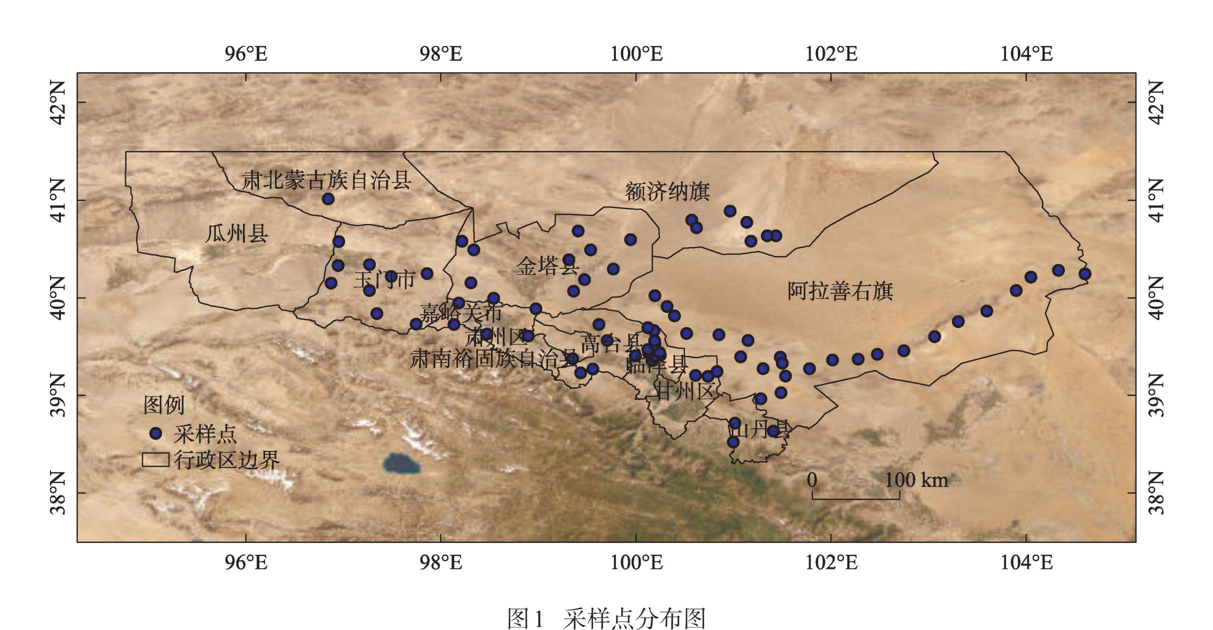
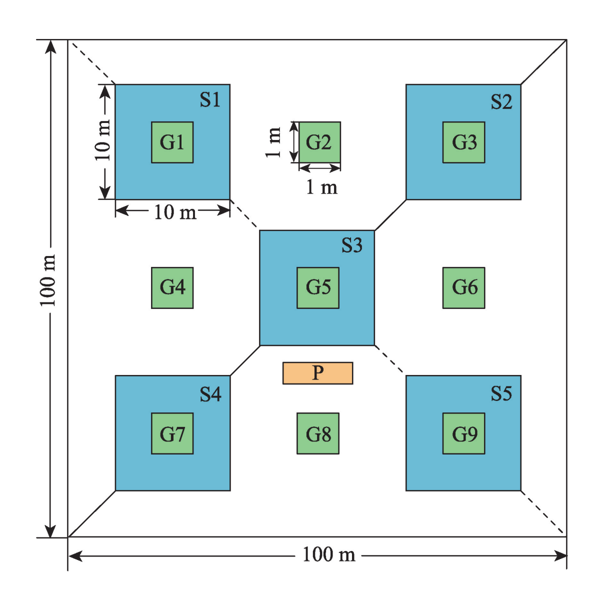



图1 采样点分布图

Fig. 1 Sampling point distribution map

设置一个100 m×100 m的样方，在样方内系统设置5个10 m×10 m的灌木样方、9个1 m×1 m的草本样方及1个土壤剖面调查点（图2）。在10 m×10 m的灌木样方内调查灌木的种类、密度、高度、冠幅和生物量。在1 m×1 m的草本样方内，调查群落物种组成、密度、高度、盖度、地上生物量。在每个样方内设置一个土壤剖面调查点，分别取0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm土层土样[19]。土壤样品风干后测定其养分含量，有机碳采用重铬酸钾外加热法，全氮含量采用凯氏定氮法测定，经$H_2SO_4$–$H_2O_2$消煮后采用钼锑抗比色法测定全磷含量，土壤指标测试方法参考《土壤农化分析》[20]。河西走廊中段及巴丹吉林沙漠地区降水、归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）及土壤质地数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）。




注：S表示灌木样方；G表示草本样方；P表示土壤剖面调查点。改自赵学勇等[19]。

图2 调查样方示意图

Fig. 2 Investigation sample square diagram

### 1.3 数据分析

为表征各个植物种在群落中的优势度，选择重要值（$IV$）为度量指标[7]，计算公式为：

$$IV=\frac{RH+RC+RF}{3} \tag{1}$$

式中：$RH$为相对高度；$RC$为相对盖度；$RF$为相对频度。

为了比较不同生境下植物区系的相似性程度，选用Jaccard相似性系数$C_j$衡量不同生境下植物区系的亲缘程度[21]，计算公式为：

$$C_j=\frac{c}{a+b-c} \tag{2}$$

式中：$a$、$b$分别为各自生境中的物种数；$c$为两个生境中共有的物种数。

为研究灌草植物及土壤养分的空间分布状况，本文使用变差函数$r(h)$进行分析，计算公式如下[22]：

$$r(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(x_i)-Z(x_i+h)\right]^2 \tag{3}$$

式中：$Z$为区域化随机变量；$Z(x_i+h)$和$Z(x_i)$分别为变量$Z$在相对应空间位置$x_i+h$和$x_i$上的取值；$N(h)$为取样间隔为$h$时的样本总数。变差函数拥有球状、高斯、指数和线性等模型，其中球状模型变差函数曲线如图3。

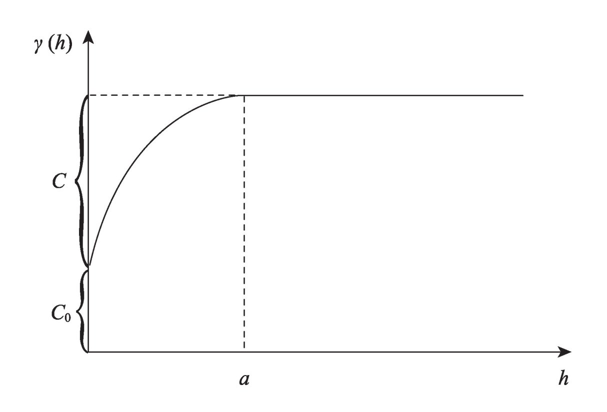



图3 球状模型变差函数曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spherical model variation function curve

根据球状模型变差函数曲线示意图（图3），变差函数有块金值$C_0$、基台值$C+C_0$、块基比$C_0/(C+C_0)$及变程$a$四个重要参数，其中，$C_0$代表实验中的一些随机因素引起的变差，$C+C_0$说明系统的总变差达到的值，$C_0/(C+C_0)$指示空间变异的程度，$a$是区域化变量差别达到最大时的采样间距。

采用R 4.3.1和OriginPro 2022进行数据分析和图形绘制。地统计分析在ArcGIS 10.8中进行，先对采样点数据进行正态检验，如数据不符合正态分布，则对数据进行转换，待转换得到的数据符合正态分布后，计算变差函数参数，并进行空间插值，空间插值方法选择普通克里金法。结合地理信息、气象因子及土壤属性因子进行主成分分析，分析环境因子之间的关系。

## 2　结果与分析

### 2.1　河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南缘群落组成特征

研究区内灌木物种共有10科、21属、31种,各科含属数都较少,其中藜科植物共有6属,占总属数最多;草本物种共有9科、31属、40种,其中藜科9属、禾本科8属、菊科7属,3个科植物占总属数的77%,这表明该地区草本植物种类趋向集中于少数科内。

表1列出了灌木及草本植物中重要值大于4%的物种,研究区荒漠植物组成以灌木-草本为主,灌木多为常见旱生荒漠植物,并伴生多年生草本。灌木植物以蒙古扁桃(*Prunus mongolica*)和红砂(*Reaumuria songarica*)为优势物种,重要值分别为11.65%和10.40%。灌木中出现频度最高的为红砂、白刺(*Nitraria tangutorum*)及盐爪爪(*Kalidium foliatum*),三者出现频度总和超过50%。草本植物以芨芨草(*Neotrinia splendens*)重要值最高,为10.52%,草本植物出现频度最高的为沙葱(*Allium mongolicum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)及白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)。灌木的平均株高差异较大,蒙古扁桃、柽柳(*Tamarix chinensis*)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的频度明显低于红砂、白刺及盐爪爪,但由于前者株高明显高于后者,这些物种的重要值差异不大。研究区内的草本植物也呈现出与灌木较为一致的特征,即频度较低但株高突出的芨芨草重要值在草本植物中最高,除芨芨草外,其他重要值较高的草本植物平均株高在20 cm以下。综合灌木和草本植物来看,重要值高于10%的物种只有3种,其余物种重要值大多在5%以下。

**表1　河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南缘典型荒漠植物组成特征**

**Tab. 1　Composition and characteristics of typical desert plants in the middle Hexi Corridor and southern edge of Badain Jaran Desert**

| 生活型 | 物种名称 | 平均株高/cm | 相对频度/% | 重要值/% |
|---|---|---|---|---|
| 灌木 | 蒙古扁桃(*Prunus mongolica*) | 176.67 | 0.38 | 11.65 |
| | 红砂(*Reaumuria songarica*) | 22.45 | 27.74 | 10.40 |
| | 柽柳(*Tamarix chinensis*) | 107.54 | 0.64 | 7.17 |
| | 白刺(*Nitraria tangutorum*) | 38.14 | 14.89 | 7.08 |
| | 珍珠猪毛菜(*Caroxylon passerinum*) | 18.74 | 2.54 | 5.25 |
| | 梭梭(*Haloxylon ammodendron*) | 112.78 | 2.04 | 5.02 |
| | 盐爪爪(*Kalidium foliatum*) | 18.56 | 10.56 | 4.72 |
| | 泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*) | 33.76 | 8.65 | 4.59 |
| | 沙拐枣(*Calligonum mongolicum*) | 59.89 | 5.22 | 4.29 |
| 草本 | 芨芨草(*Neotrinia splendens*) | 108.89 | 0.92 | 10.52 |
| | 沙葱(*Allium mongolicum*) | 12.09 | 12.80 | 5.11 |
| | 猪毛菜(*Salsola collina*) | 15.16 | 10.15 | 5.11 |
| | 白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*) | 15.16 | 9.57 | 4.76 |
| | 针茅(*Stipa capillata*) | 21.06 | 6.81 | 4.68 |
| | 沙鞭(*Psammochloa villosa*) | 45.32 | 4.50 | 4.38 |

为了比较不同生境下植物区系的相似性程度,将研究区划分为三种生境,分别是包括嘉峪关市和酒泉市的戈壁生境、以张掖市为主的荒漠—绿洲过渡带生境及阿拉善盟境内的荒漠生境,并计算三种生境相互之间的Jaccard相似性系数,所得结果如表2。

**表2　不同生境间灌木及草本植物Jaccard系数**

**Tab. 2　Jaccard coefficient of shrubs and herbaceous plants in different habitats**

| 生境 | 灌木 | | 草本 | |
|---|---|---|---|---|
| | 戈壁 | 荒漠 | 戈壁 | 荒漠 |
| 荒漠—绿洲过渡带 | 0.417 | 0.565 | 0.222 | 0.459 |
| 荒漠 | 0.333 | | 0.355 | |

戈壁与荒漠间的灌木及草本相似性均较低,荒漠与荒漠—绿洲过渡带的植被较为相似,而荒漠—绿洲过渡带与戈壁的灌木及草本的相似性表现出不一样的趋势,灌木在戈壁与过渡带相似程度较高,Jaccard系数为0.417,而草本在两种生境间相似程度低,Jaccard系数仅为0.222。

### 2.2　典型荒漠植物生物量空间分布特征

整体来看,研究区内草本植物地上生物量呈现出西北低、东南高的分布特征(图4),生物量极高区域出现在最南部的张掖市山丹县,且该县境内生物量出现17.7~93.5 $g\cdot m^{-2}$的大幅度变化。区内西北部草本生物量极低,金塔县以西大部分地区草本地上生物量低于3 $g\cdot m^{-2}$。

灌木植物生物量高值出现在研究区中部,呈东北—西南带状分布,西北部灌木生物量与草本生物量均达到较低值,但研究区东南部灌木生物量与草本生物量呈现截然相反的分布特征,东南部灌木生物量反而出现了极低值(图5)。而在东北—西南方

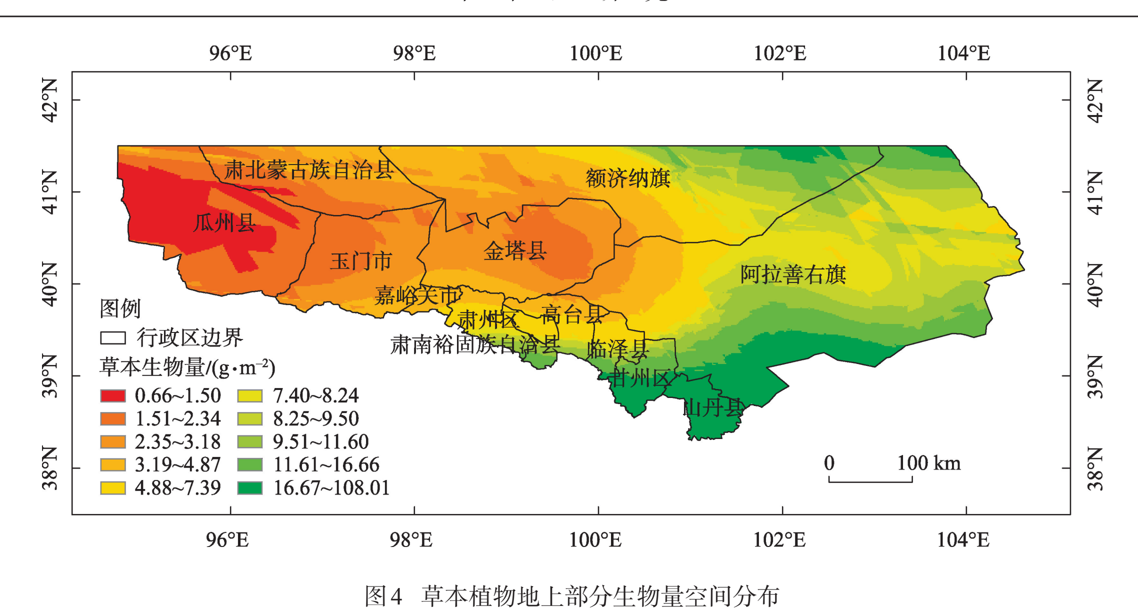



图4 草本植物地上部分生物量空间分布

Fig. 4 The spatial distribution map of aboveground biomass of herbaceous plants

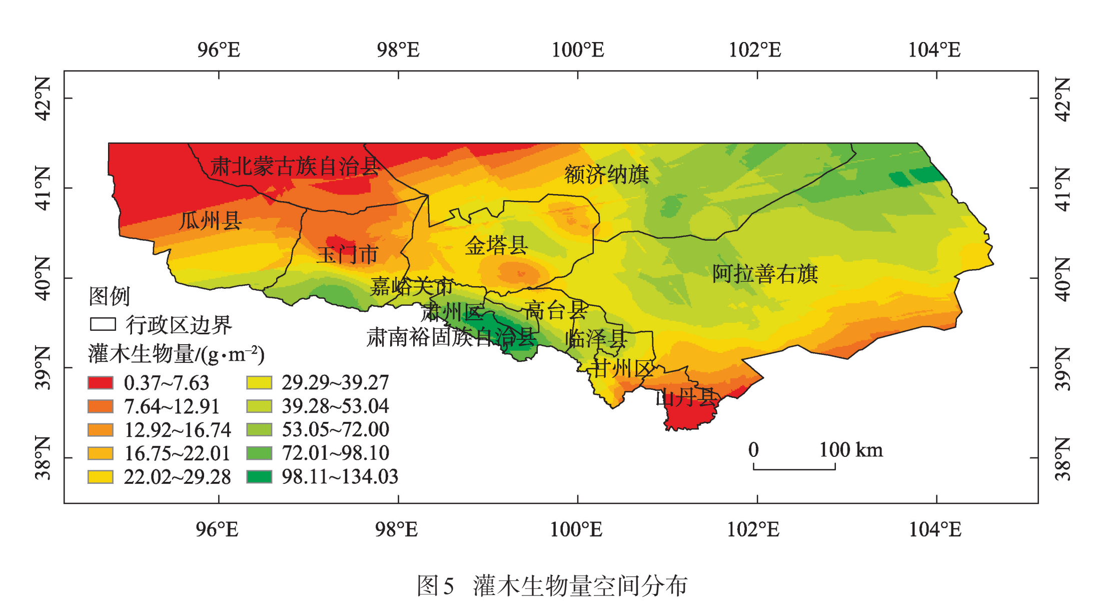



图5 灌木生物量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution map of shrub biomass

向的灌木生物量高值分布带，越靠近祁连山北坡的肃州区，灌木生物量越高。

### 2.3 土壤养分空间分布特征

从垂直方向上看，土壤有机碳（Soil Organic Carbon，SOC）、总氮（Total Nitrogen，TN）和总磷（Total Phosphorus，TP）均在0~20 cm土层达到最大含量，分别为2.12 $g\cdot kg^{-1}$、0.25 $g\cdot kg^{-1}$和0.41 $g\cdot kg^{-1}$，而随着土壤深度的加深，SOC和TN逐渐减少，值域也不断收窄，变异系数总体呈中等强度变异水平，表层变异系数及峰度皆高于底层，同时表层偏度均小于底层，底层数据较表层更加集中，且较低值更多（表3），这表明研究区内土壤有机碳和总氮含量存在表层聚集的现象，且表层养分含量变异程度更大。而不同深度总磷的变化特征与SOC和TN存在差异，虽然TP的均值也会随着深度增大而减少，但其变异系数及偏度随土层加深而增大，底层TP比表层更离散。但综合三种指标来看，SOC和TN的数值较TP更加离散，TP在调查点间的差异小于SOC和TN。

如表4所示，研究区SOC及TP的块金值在20~60 cm土层深度达到最大，60~100 cm块金值最低，二者基台值随土壤深度加深不断减小，块基比变化趋势与块金值较一致，在20~60 cm土层达到最大，分别为0.931、0.944，综合四种变差函数参数，表层SOC与TP空间变异较大，空间相关性比深层土壤属

表3　研究区不同土层土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)描述性统计

Tab. 3　Descriptive statistics of SOC, TN, and TP in different soil layers of the study area

| | 土层深度/cm | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数 | 偏度 | 峰度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SOC/($g\cdot kg^{-1}$) | 0~20 | 0.51 | 6.39 | 2.12 | 1.46 | 0.686 | 1.363 | 3.725 |
| | 20~60 | 0.52 | 6.96 | 2.05 | 1.40 | 0.680 | 1.570 | 4.856 |
| | 60~100 | 0.48 | 5.89 | 1.71 | 0.74 | 0.638 | 1.854 | 6.388 |
| TN/($g\cdot kg^{-1}$) | 0~20 | 0.05 | 0.83 | 0.25 | 0.20 | 0.790 | 1.427 | 4.046 |
| | 20~60 | 0.04 | 0.93 | 0.23 | 0.18 | 0.801 | 1.588 | 5.237 |
| | 60~100 | 0.04 | 0.69 | 0.19 | 0.15 | 0.778 | 1.834 | 5.832 |
| TP/($g\cdot kg^{-1}$) | 0~20 | 0.24 | 0.70 | 0.41 | 0.11 | 0.254 | 0.778 | 3.242 |
| | 20~60 | 0.18 | 0.73 | 0.38 | 0.12 | 0.317 | 0.893 | 3.757 |
| | 60~100 | 0.15 | 0.87 | 0.38 | 0.13 | 0.333 | 0.987 | 4.806 |

表4　变差函数参数

Tab. 4　Variogram function parameters

| 土壤养分 | 土壤深度/cm | 块金值($C_0$) | 基台值($C+C_0$) | 块金值/基台值($C_0/C+C_0$) | 变程($a$)/(°) |
|---|---|---|---|---|---|
| SOC | 0~20 | 0.312 | 0.396 | 0.788 | 8.148 |
| | 20~60 | 0.333 | 0.358 | 0.931 | 5.418 |
| | 60~100 | 0.177 | 0.283 | 0.624 | 1.129 |
| TN | 0~20 | 0.040 | 0.050 | 0.788 | 1.013 |
| | 20~60 | 0.065 | 0.082 | 0.793 | 1.013 |
| | 60~100 | 0.082 | 0.091 | 0.900 | 1.066 |
| TP | 0~20 | 0.209 | 0.279 | 0.748 | 8.148 |
| | 20~60 | 0.222 | 0.236 | 0.944 | 4.038 |
| | 60~100 | 0.145 | 0.225 | 0.643 | 1.315 |

性更差。TN的空间相关性表现出与SOC及TP不同的变化现象,随着土层的加深,TN的块金值、基台值及块基比皆在变大,而块基比最大值出现在60~100 cm土层,为0.900,表层TN的空间相关性反而强于深层土壤。

从空间上看,三种土壤养分含量最高值出现在张掖市山丹县境内,最低值出现在巴丹吉林沙漠与金塔盆地区域,呈现出以巴丹吉林沙漠及金塔盆地为低值中心向四周辐射增高的变化趋势(图6~图8)。且区内大部分地区养分含量低于依靠调查点数据统计得到的样本均值,总体水平较低,插值后全区平均值变化趋势与描述性统计所得趋势一致。表层土壤养分的高值皆出现在研究区南部张掖绿洲附近,TP高值分布更离散,其等值线大致与祁连山脉平行分布,且在研究区南部等值线密度更高,养分变异程度更大。

**2.4　植被及土壤特征与典型气候因子的关系**

主成分分析结果表明PC1与PC2共解释了研究区环境差异的66.30%(表5)。对前四主成分进行分析(图9),第一主成分中,贡献率较大的是土壤养分数据,养分中SOC与TN在研究区中的空间差异是造成生境差异的重要因素。第二主成分中贡献较大的是土壤质地,贡献率皆大于25%,且沙粒的贡献与黏粒和粉黏粒相反。年均降水对第一、第二主成分的贡献率分别为3.71%、0.43%,但对第三主成分的贡献率达到27.41%,是继土壤养分和土壤质地之后对生境产生重要影响的生态因子。

研究区各环境因子之间存在一定程度上的相关性(图10),土壤养分与海拔、NDVI及降水呈正相关关系,与土壤质地基本互不影响。土壤黏粒、粉黏粒含量与降水、NDVI呈弱正相关关系,与沙粒呈负相关关系。降水与海拔呈正相关关系。

将取样点年均降水量划分为不同降水梯度,使用方差分析研究降水对生物量的影响,结果显示,灌木生物量在各降水梯度下的差异不显著($P$>0.05),但随着年均降水的增加,灌木生物量有先增大后减小的趋势,年降水量100 mm左右时出现最大值。草本生物量在各降水梯度下差异显著,随着年

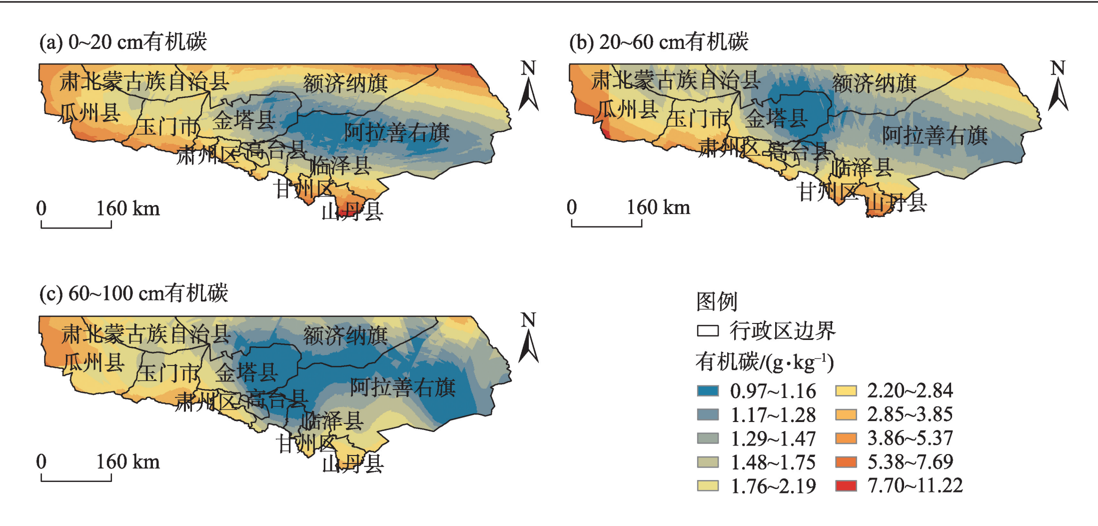



图6 土壤有机碳含量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution map of soil organic carbon content

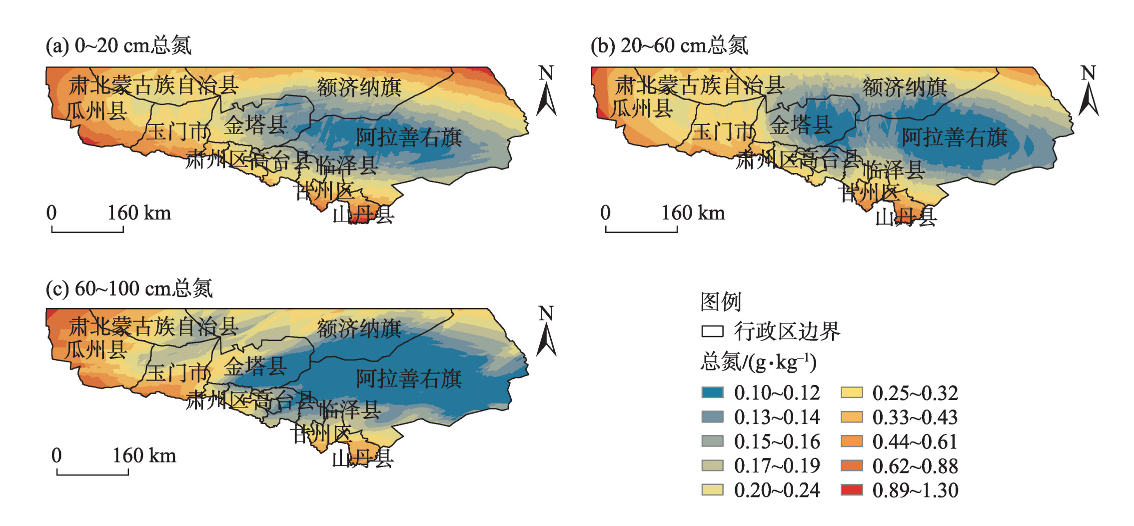



图7 土壤总氮含量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution map of soil total nitrogen content

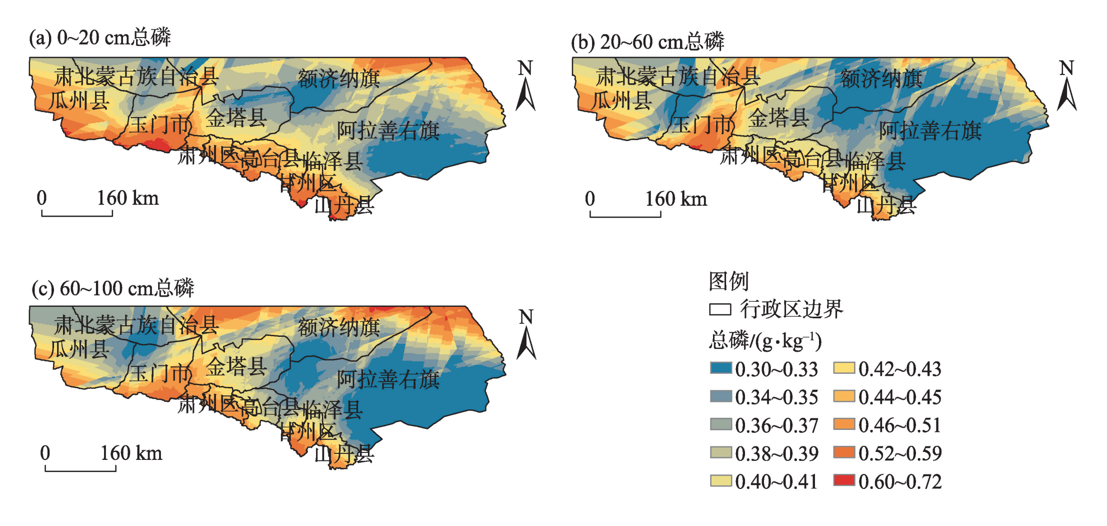



图8 土壤总磷含量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution map of soil total phosphorus content

表5　主成分方差贡献率

**Tab. 5　Principal component variance contribution rate**

| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 方差 | 2.69 | 1.65 | 1.23 | 1.10 | 0.84 |
| 解释方差百分比/% | 48.20 | 18.10 | 10.10 | 8.04 | 4.69 |
| 累计解释方差百分比/% | 48.20 | 66.30 | 76.40 | 84.44 | 89.13 |

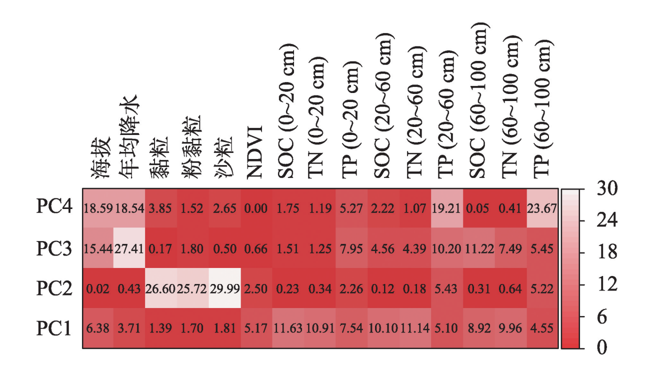



图9　前四主成分贡献率

Fig. 9　First four principal component variance contribution rates

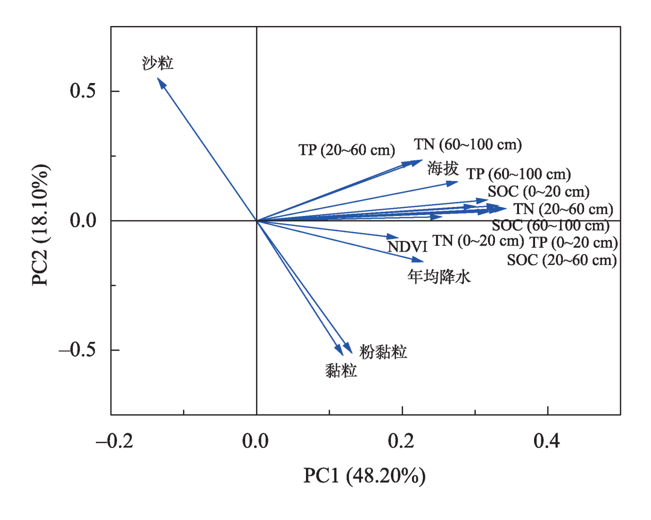



图10　主成分分析图

Fig. 10　Principal component analysis (PCA) plot

降水量的增加而增加(表6)。

表6　不同降水梯度下的植被生物量

**Tab. 6　Vegetation biomass under different precipitation gradients**

| 年均降水/mm | 灌木生物量/(g·m$^{-2}$) | 草本生物量/(g·m$^{-2}$) |
|---|---|---|
| 0~50 | 41.27±12.43$^{a}$ | 9.28±4.18$^{b}$ |
| 50~100 | 42.00±9.52$^{a}$ | 9.82±4.36$^{b}$ |
| 100~150 | 34.70±3.26$^{a}$ | 13.31±2.16$^{b}$ |
| >150 | 23.86±6.96$^{a}$ | 27.41±11.01$^{a}$ |

注:不同字母表示在0.05水平上显著,相同字母表示在0.05水平上不显著。

## 3　讨　论

### 3.1　荒漠植物群落组成及分布特征

河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南缘生境恶劣,灌木物种组成较为简单,伴生物种种类少。区内灌木植物中出现频度最高的红砂、白刺及盐爪爪皆为适应干旱、盐碱环境的植物,且三种植物均能在沙埋情况下通过不同策略生发新枝,形成沙堆,保证其存活率,在荒漠区广泛存在[2,23]。草本植物群落在河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南缘也较为常见,但草本群落的组成结构比较单一、物种少,且草本物种大多集中在藜科、禾本科和菊科,形成了3个优势科,生物多样性较差,这与张德魁等[24]的研究结果一致。研究区内草本优势物种为芨芨草、沙葱和猪毛菜,均为荒漠常见物种。研究区内株高较高的植物受自身高度的限制,使得荒漠中本就不多的水分更难被输送到这些植物的各个器官,抑制了植物的生长,甚至在极端干旱年份植物会局部枯死[25],这些植物在水分竞争中处弱势地位,相对频度较低。整体来看,河西走廊中段及巴丹吉林沙漠具有物种多样性低、群落结构简单、物种类型少的特点[9,26]。

植物不同的生活型是对环境条件的不同适应,其差异主要取决于资源利用策略、竞争能力和生理特征。在河西走廊地区,年降水量从东南向西北逐渐减少,在不同降水梯度下,草本植物生物量也随降水的减少呈递减趋势;而灌木的生物量随着降水的增加先增加后减少,存在一条贯穿研究区中部,且沿东北—西南走向分布的高值带。研究发现,干旱环境中不同的植物有不同的水分利用策略[27-28],灌木的根系普遍比草本更加强大,使其可以更加充分地利用不同层次土壤中的水分,有些灌木根系甚至能够直接抽取地下水[29],在大范围沙地中,灌木更容易存活;而草本植物的浅根系主要利用降雨事件后短期贮留在浅层土壤中的水分[30],对降水变化敏感,在降水较多的地区有比灌木更大的生长优势。虽然较高的土壤含水率能促进灌木和草本植物的生长,但是当水分超过一定限度,灌木在该生境内的优势度将低于草本[31],研究区山丹县境内的灌木生物量很低,这可能与当地丰富的降水密切相关,迅速生长的草本侵占了灌木的生存空间,影响

了灌木群落的扩张[7]。

Jaccard相似度系数显示，过渡带植被与荒漠较为相似，荒漠与戈壁植被相似度处于中等不相似水平（0.25~0.5），过渡带与戈壁的灌木相似程度大于草本。土壤含水率是影响荒漠区植被的重要因素[27]，研究区内荒漠与绿洲基本分布在同一纬度区域，年降水与蒸发较为一致，过渡带受人类活动影响更深，过渡带内的植被与荒漠产生了一定的不相似性，但总体上过渡带与荒漠植被相似程度依旧较高。戈壁的环境更不适合植被生长，且戈壁土壤储存水分和养分的能力更差，戈壁蒸发量与降水量间的差异更大，戈壁表面更容易累积盐分[32-33]，综合多种原因，戈壁与其他两种生境差异很大，戈壁植被与其他生境中的植被相似程度不高。而灌木对生境的适应能力强于草本植物[28-29]，因此过渡带与戈壁生境中灌木的Jaccard系数高于草本植物。

### 3.2 土壤养分空间格局

研究区内土壤SOC、TN和TP在垂直方向上表现出“表聚性”，这与王燕等[34]的研究结果一致，且综合所有调查点数据看，表层土壤养分数据离散程度更高。水平方向上，研究区内土壤养分空间变异程度高，空间自相关性弱，与史尧方等[17]在阿里地区的研究结果相似程度高。而20~60 cm土壤养分变异程度大于其他土壤层次，这可能与荒漠植物根系分布有关，植物对营养成分的利用成为土壤养分的影响因子，养分的分布状况变得更加复杂。降水与土壤养分呈正相关关系[17]，土壤含水率也会影响土壤中C、N、P的计量特征[35]，张掖绿洲在研究区内降水相对较高，是土壤养分在研究区南部张掖绿洲附近达到最大值的原因之一；且有研究表明，人为因素能够干扰绿洲土壤表层有机质含量，这也会改变土壤养分的空间分布[15-16]。气流经过地表，对土壤产生侵蚀，气流携带的土壤颗粒落回地表，会导致养分在空间上的再分配，但气流对颗粒的搬运效果是有限的，距离越近的土壤性质也越相似[15,36]。张掖绿洲区农业发达，化肥的使用、较高的植被覆盖度使得绿洲区土壤有机质相较于荒漠区更高，绿洲土壤被风力侵蚀并搬运，距城镇越近土壤养分状况越好，养分在水平方向上的分布受人类活动影响较大。

总体来说，研究区内土壤养分含量偏低，该区极端干旱，植被极度匮乏，自然环境恶劣，植物根系及枯枝落叶等土壤养分来源极少，造成土壤养分状况极差。

### 3.3 荒漠植被及土壤养分空间分布与关键气象要素的相关关系

河西走廊中段及巴丹吉林沙漠南缘的土壤养分含量存在明显的偏态分布，绿洲表层土壤养分含量相对较高，绿洲内的农田及过渡带的松林地带拥有更多的腐殖质，其分解产物不断提供养分到土壤中，使绿洲土壤养分状况好于荒漠区[35]。河西走廊张掖段沿自东向西方向，荒漠土壤质地不断恶化，持水性能下降[37]，不仅影响土壤水分的维持，且粗粒化的土壤更容易流失养分。土壤是复杂的自然综合体，其属性受气候、植被等环境因子的影响，而土壤属性也会影响在其上生长的植物，河西走廊中段的荒漠—绿洲过渡带使区内环境变得复杂，不同利用方式下的土壤有不同演化方向及速度，研究区内土壤属性差异大，成为影响区内生境的主要因素。

降水是荒漠植被的主要水分来源，河西走廊及巴丹吉林沙漠地区降水分配不均匀，降水量在不同的地理位置及海拔高度有显著差异[3]，但是区内的天然降水极其有限，在不同荒漠生境的形成过程中不能起到决定性作用。荒漠区深根系植物生命活动的维持不仅依赖浅层地表水分，还会吸取地下水，地下水埋深的增加显著降低了物种丰富度、地上生物量、群落覆盖率、群落高度和叶面积指数[38]，深刻影响着荒漠生态系统，后续可以对地下水与荒漠植被及土壤养分间的关系进行进一步研究。研究区内众多环境因子之间存在一定的联系，这与前人研究一致[16-17,35,39]，环境因子之间相互影响、相互作用，不同因子排列组合形成了众多各具特点的生境。

## 4 结 论

（1）河西走廊中段及巴丹吉林沙漠灌木物种组成较为简单，伴生物种种类少，形成了少数优势科，大多数植物平均株高较矮，出现频度较高的植物均为荒漠中常见的耐旱耐盐植物。

（2）草本生物量分布趋势与年均降水量一致，最高值出现在最南端的山丹县。当降水量超过一定限度时，草本植物大幅增加。灌木生物量分布状

况更为复杂,形成沿东北—西南的带状分布,最高值出现在酒泉市肃州区。

(3)表层土壤养分含量均高于深层,且空间变异程度大,各类土壤养分的空间自相关性差,造成养分分布格局的原因复杂。土壤养分等值线大致平行于巴丹吉林沙漠及金塔盆地边缘,最高值出现在研究区南部张掖绿洲附近。

(4)土壤养分对第一主成分贡献最高,土壤质地对第二主成分贡献最高,因此造成研究区生境差异的主要影响因子是土壤属性,且各环境变量之间存在一定的相关性。

## 参考文献(References):


[1] 王新源, 马立鹏, 程小云, 等. 不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5869-5883. [Wang Xinyuan, Ma Lipeng, Cheng Xiaoyun, et al. Effects of different sand control measures on plant communities and soil factors in the desert-oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5869-5883. ]

[2] 彭鸿嘉, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 甘肃民勤荒漠区植被演替特征及驱动力研究——以民勤为例[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 112-117. [Peng Hongjia, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Study on features of vegetation succession and its driving force in Gansu desert areas—a case study at Minqin County[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 112-117. ]

[3] 王素萍, 宋连春, 韩永翔. 河西走廊地区气候和绿洲生态研究的若干进展[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 78-83. [Wang Suping, Song Lianchun, Han Yongxiang. Research progress on climatic characteristics and oasis ecology in Hexi Corridor[J]. Arid Meteorology, 2006, 24(2): 78-83. ]

[4] 赵文智, 白雪莲, 刘婵. 巴丹吉林沙漠南缘的植物固沙问题[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 5-11. [Zhao Wenzhi, Bai Xuelian, Liu Chan. Research on vegetation sand control around the south edge of Badain Jaran Sand Sea, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(1): 5-11. ]

[5] 刘璐. 巴丹吉林沙漠南部植物群落特征及其土壤理化性质研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2023. [Liu Lu. Plant Community Characteristics and Soil Physicochemical Properties in Southern Badain Jaran Desert[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2023. ]

[6] 沈禹颖, 阎顺国, 朱兴运. 河西走廊盐化草甸主要植物群落分布特点及其土壤环境特征[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 95-102. [Shen Yuying, Yan Shunguo, Zhu Xingyun. The distribution and soil environmental properties of the main plant communities in a salinized meadow land of Hexi Corridor[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1994, 18(1): 95-102. ]

[7] 陈宏彬, 苏培玺, 严巧娣, 等. 河西走廊植物群落特征及其与气候的关系初探[J]. 西北植物学报, 2007, 27(5): 1008-1016. [Chen Hongbin, Su Peixi, Yan Qiaodi, et al. Preliminary study of plant community characteristics and their relationships with climate in the Hexi Corridor region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(5): 1008-1016. ]

[8] 吴旭东, 蒋齐, 王占军, 等. 降水对荒漠草原地上生物量稳定性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(11): 30-39. [Wu Xudong, Jiang Qi, Wang Zhanjun, et al. Effects of precipitation on the stability of aboveground biomass in desert steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(11): 30-39. ]

[9] 董雪, 李永华, 辛智鸣, 等. 河西走廊西段戈壁灌木群落多样性及其分布格局研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1514-1522. [Dong Xue, Li Yonghua, Xin Zhiming, et al. Gobi shrub species diversity and its distribution pattern in west Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1514-1522. ]

[10] 甘开元, 张金霞, 陈丽娟, 等. 乌兰布和沙漠沿黄河段植物群落特征及空间分异[J]. 中国沙漠, 2023, 43(4): 180-190. [Gan Kaiyuan, Zhang Jinxia, Chen Lijuan, et al. Characteristics and spatial differentiation of plant communities along the Yellow River in the Ulan Buh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(4): 180-190. ]

[11] 韩高玲, 霍建强, 赵燕翘, 等. 鄂尔多斯高原砒砂岩地区草本物种组成及多样性[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 243-251. [Han Gaoling, Huo Jianqiang, Zhao Yanqiao, et al. Analysis of herbaceous species composition and diversity in the Ordos Arsenic Sandstone Areas[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 243-251. ]

[12] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 等. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 53-58. [Yu Yunjiang, Shi Peijun, Lu Chunxia, et al. Response of the eco-physiological characteristics of some plants under blown sand[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(1): 53-58. ]

[13] 董雪, 李永华, 辛智鸣, 等. 河西走廊西段荒漠戈壁灌木群落物种多样性的海拔格局[J]. 林业科学, 2021, 57(2): 168-178. [Dong Xue, Li Yonghua, Xin Zhiming, et al. Patterns of altitudinal distribution of species diversity of desert gobi shrub communities in west Hexi Corridor of China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(2): 168-178. ]

[14] 郭方君, 马全林, 张锦春, 等. 石羊河流域荒漠区植被类型、分布和数量特征 [J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1848-1857. [Guo Fangjun, Ma Quanlin, Zhang Jinchun, et al. Vegetation types, distribution and quantitative characteristics in the desert area of Shiyang River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1848-1857. ]

[15] 杨强军. 焉耆盆地耕地土壤养分及盐分时空变化分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. [Yang Qiangjun. Spatio-temporal Variation of Soil Nutrients and Dalinity in Cultivated Land of Yanqi Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. ]

[16] 杨霰. 夏尔希里地区土壤养分与盐分空间分异特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2021. [Yang Xian. Study on Spatial Dif-

ferentiation of Soil Nutrients and Salinity in the Xarxili Region[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2021. ]

[17] 史尧方, 薛娴, 尤全刚, 等. 阿里荒漠区土壤有机碳分布特征及其与土壤物理性质的关系[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 284-294. [Shi Yaofang, Xue Xian, You Quangang, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with soil physical properties in Ali Desert Area, Tibetan Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 284-294. ]

[18] 常帅, 于红博, 张巧凤, 等. 锡林郭勒草原土壤速效氮空间变异分析[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 11-21. [Chang Shuai, Yu Hongbo, Zhang Qiaofeng, et al. Analysis of spatial variability of soil available nitrogen in Xilingol grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(7): 11-21. ]

[19] 赵学勇, 安沙舟, 曹广民, 等. 中国荒漠主要植物群落调查的意义、现状及方案[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 9-19. [Zhao Xueyong, An Shazhou, Cao Guangmin, et al. Surveying desert major plant communities in China: Implications, current status, and scheme [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(1): 9-19. ]

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil and Agriculturel Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. ]

[21] Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone. 1 [J]. New Phytologist, 1912, 11(2): 37-50.

[22] Robertson G P. Geostatistics in ecology-interpolating with known variance [J]. Ecology, 1987, 68(3): 744-748.

[23] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 933-942. [Li Xiaole, Wei Yajuan, Dang Xiaohong, et al. Soil mechanical composition and soil nutrient content of *Reaumuria soongorica* nebkhas[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 933-942. ]

[24] 张德魁, 马全林, 刘有军, 等. 河西走廊荒漠区一年生植物组成及其分布特征[J]. 草业科学, 2009, 26(12): 37-41. [Zhang Dekui, Ma Quanlin, Liu Youjun, et al. Composition and distribution characteristics of annual plant in desert area in Hexi Corridor[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(12): 37-41. ]

[25] 朱教君. 防护林学研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 872-888. [Zhu Jiaojun. A review of the present situation and future prospect of science of protective forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(9): 872-888. ]

[26] 姜亚东, 吕世杰, 刘红梅, 等. 巴丹吉林沙漠东缘主要灌木数量特征及空间分布[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 295-304. [Jiang Yadong, Lv Shijie, Liu Hongmei, et al. Analysis of quantitative characteristics and spatial distribution for main shrubs on the eastern edge of the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 295-304. ]

[27] Golluscio R A, Sala O E, Lauenroth W K. Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses: A manipulative experiment in the Patagonian steppe [J]. Oecologia, 1998, 115(1-2): 17-25.

[28] Yoder C K, Nowak R S. Soil moisture extraction by evergreen and drought-deciduous shrubs in the Mojave Desert during wet and dry years [J]. Journal of Arid Environments, 1999, 42(2): 81-96.

[29] 许皓, 李彦, 谢静霞, 等. 光合有效辐射与地下水位变化对柽柳属荒漠灌木群落碳平衡的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(4): 375-386. [Xu hao, Li Yan, Xie Jingxia, et al. Influence of solar radiation and groundwater table on carbon balance of phreatophytic desert shrub *Tamarix*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(4): 375-386. ]

[30] Knoop W T, Walker B H. Interactions of woody and herbaceous vegetation in a southern African savanna[J]. Journal of Ecology, 1985, 73(1): 235-253.

[31] Abd El-Ghani M M, Amer W M. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(4): 607-628.

[32] 安富博, 张德魁, 赵锦梅, 等. 河西走廊不同类型戈壁土壤理化性质分析[J]. 中国水土保持, 2019, 36(6): 42-47. [An Fubo, Zhang Dekui, Zhao Jinmei, et al. Soil physical and Chemical properties of different types of gobi desert in Hexi Corridor[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019, 36(6): 42-47. ]

[33] 张德魁, 安富博, 赵艳丽, 等. 甘肃河西走廊典型戈壁土壤粒度特征分析 [J]. 中国水土保持, 2020, 37(11): 41-45. [Zhang Dekui, An Fubo, Zhao Yanli, et al. Analysis of grain size characteristics of typical gobi soil in Hexi Corridor of Gansu Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020, 37(11): 41-45. ]

[34] 王燕, 武兴宝, 秦新惠, 等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中的土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(8): 1996-2005. [Wang Yan, Wu Xingbao, Qin Xinhui, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in farmland salinization in arid oasis[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(8): 1996-2005. ]

[35] 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 等. 河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3353-3363. [Sun Xue, Long Yongli, Liu Le, et al. Soil stoichiometry characterization in the oasis-desert transition zone of Linze, Zhangye[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3353-3363. ]

[36] 赵海鹏, 宋宏权, 刘鹏飞, 等. 1980—2015年风蚀影响下中国北方土壤有机质与养分流失时空特征[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2778-2789. [Zhao Haipeng, Song Hongquan, Liu Pengfei, et al. Spatio-temporal variations of soil organic matter and nutrient losses resulted from wind erosion in northern China from 1980 to 2015[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2778-2789. ]

[37] 王蕙, 赵文智, 武利玉. 河西走廊荒漠区土壤物理性质沿降水梯度的变化 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 46-51. [Wang Hui, Zhao Wenzhi, Wu Liyu. Change of soil physical properties with precipitation gradient in desert region of Hexi Corridor[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6): 46-51. ]

[38] Zhang X, Guan T, Zhou J, et al. Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert ripari-

an ecosystem in an arid area of China[J]. Forests, 2018, 9(1): 34.

[39] 曹琪琪. 乌兰布和沙漠东北部绿洲化进程中土壤性质演变特征及影响因素[D]. 北京: 北京林业大学, 2022. [Cao Qiqi. The Evolution of Soil Properties and Its Influencing Factors during the Oasis-Making Processes in the Northeastern Part of Ulanbuh Desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022. ]

# Desert vegetation composition and spatial distribution of soil nutrients in the middle section of Hexi Corridor

AN Ning[1,2], GUO Bin[3], ZHANG Dongmei[1], YANG Qiyue[1], LUO Weicheng[1]

(1. Linze Inland River Basin Research Station, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** Desert vegetation is an important ecological protection barrier for oasis ecosystems in the Hexi Corridor. Studying the composition of desert vegetation and the spatial distribution of soil nutrients is important to the construction and management of desert-oasis transition zone vegetation. This study is based on several field surveys. Traditional statistical and geostatistical methods were used to investigate the composition of desert vegetation and soil nutrient characteristics in the middle section of the Hexi Corridor and the southern fringe of the Badain Jaran Desert, and their correlation with environmental factors were analyzed. Results indicated that the plant composition in the desert areas of the middle section of the Hexi Corridor and the southwestern fringe of the Badain Jaran Desert was single and had low diversity, with plant species concentrated in a few families. Typical desert plants such as *Reaumuria songarica* and *Nitraria tangutorum* were frequently found in the study area. The distribution of herbaceous plants was strongly correlated with the average annual precipitation. In Shandan County, which is located in the southern part of the study area, the biomass of herbaceous plants reached 108.01 $g \cdot m^{-2}$. Within a certain range of annual precipitation, the biomass of shrubs increased with the increase of precipitation, with the highest value occurring in Suzhou County, near the northern slope of the Qilian Mountains, at 134.03 $g \cdot m^{-2}$. Increasing precipitation significantly promoted the growth of herbaceous plants. The surface soil had the highest organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus contents in the study area, with average values of 2.12, 0.25, and 0.41 $g \cdot kg^{-1}$, respectively, and higher levels of variability than those in the soil subsurface. In the horizontal direction, the three types of soil nutrients had high variability and weak spatial autocorrelation, with maximum values of 11.22, 1.30, and 0.73 $g \cdot kg^{-1}$ near Zhangye Oasis. Principal component analysis showed that soil properties and precipitation were the primary factors causing habitat differences in the study area. However, different environmental factors interacted with one another to jointly drive desert vegetation composition and distribution.

**Keywords:** middle section of Hexi Corridor; species composition; soil nutrients; environmental factors; southern fringe of Badain Jaran Desert